

Il progetto GIQS: Graphene Impedance Standard

Un Joint Research Project EMPIR

ABSTRACT

The project *GIQS: Graphene Impedance Quantum standard* is a Joint Research Project of the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). The goal of the project is the realisation of the SI units of electrical impedance by traceability to the quantum Hall resistance in graphene devices. The project, and the role of the Italian partners, is described.

RIASSUNTO

Il progetto *GIQS: Graphene Impedance Quantum standard* è un Joint Research Project dell'European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR). Il progetto mira alla realizzazione delle unità SI d'impedenza elettrica per riferibilità alla resistenza quantizzata di Hall in dispositivi in grafene. Viene descritto il progetto e il ruolo dei partner italiani.

IL PROGETTO

La revisione del Sistema Internazionale di unità, entrata in vigore il 20 maggio 2019, definisce le unità dell'impedenza elettrica in termini di due costanti fondamentali, la costante di Planck h e la carica elementare e . La realizzazione pratica (*mise en pratique*) [1] delle unità elettriche ohm, henry e farad (legate fra loro dall'unità di tempo, il secondo: $1 \Omega = 1 \text{ H s}^{-1} = 1 \text{ F}^{-1} \text{ s}$) è associata alla resistenza di Hall quantizzata, il cui valore $R_H = h/(ie^2)$ è appunto completamente determinato dai valori $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$ e $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J s}$, fissati come esatti nelle definizioni delle unità ampere e kilogrammo, e da un numero intero i (tipicamente, $i = 2$ e $R_H = 12906,403\,729\,6522 \Omega$).

La misura di campioni materiali d'impedenza in termini della resistenza di Hall quantizzata richiede complessi sistemi di misura con elementi criogenici, non disponibili sul mercato, ed è stata affrontata solo da alcuni tra i grandi istituti metrologici primari [2]. I sistemi attualmente sviluppati risultano complessi e costosi, e la loro operazione richiede personale di grande esperienza.

Il progetto *GIQS: Graphene Impedance Quantum standard* [3] è un Joint Research Project dell'European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR), un programma di coordinamento gestito dall'European Association of National Metrology Institutes (EURAMET). Scopo del progetto è permettere a istituti metrologici, centri di taratura industriali e centri di ricerca, la riferibilità della misura d'impedenza elettrica all'effetto Hall quantistico e, pertanto, alle costanti fondamentali che definiscono il nuovo Sistema Internazionale di unità, in modo efficiente e più economico.

Due sono gli elementi chiave del progetto. Il primo è lo sviluppo di dispositivi per effetto Hall quantistico in grafene, un materiale in cui l'effetto si manifesta per campi magnetici più bassi e temperature più elevate che in dispositivi più convenzionali a semiconduttore [4]. Queste proprietà permettono d'impiegare sistemi criogenici semplificati e, in particolare, criostati *dry* per un'operatività continua nel tempo. Il secondo punto è la realizzazione di ponti d'impedenza digitali [5], che consentano incertezze di misura a livello primario (dell'ordine di parti in 10^7 o

migliori) con elevata semplicità di costruzione e d'impiego, e di automazione della misura.

Gli obiettivi specifici del progetto sono:

1. ottimizzare la produzione di grafene e dei dispositivi per l'impiego in regime alternato (AC quantum Hall effect, ACQHE) anche a temperature superiori ai 4 K e a campi magnetici di bassa intensità e comunque inferiori ai 6 T;

2. sviluppare ponti di misura digitali per il campo di capacità da 10 pF a 10 nF e frequenze fino a 100 kHz, e un ponte d'impedenza in grado di operare nell'intero piano complesso, basato sulla generazione di forme d'onda sinusoidali con dispositivi Josephson e frequenze fino a 50 kHz;

3. combinare in sistemi di taratura automatizzati i dispositivi e i ponti d'impedenza sviluppati ai punti 1 e 2, per poter effettuare tarature di campioni di capacità, riferiti all'SI e con incertezze dell'ordine di 0,01 F/F, per il ponte Josephson, o di 0,1 F/F, per i ponti digitali;

4. sviluppare un sistema di refrigerazione in criocooler in grado di ospitare sia generatori di forme d'onda Josephson che dispositivi per ACQHE, che costituisca l'elemento chiave per un campione di resistenza e impedenza riferibile al nuovo SI;

5. agevolare l'accesso all'infrastruttura metrologica e il trasferimento delle tecnologie sviluppate nel corso del progetto verso altri istituti metrologici, centri di taratura e l'industria.

I partner del progetto sono riportati in Fig. 1.

¹ Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Torino
l.callegaro@inrim.it

² Dip. Elettronica e Telecomunicazioni, Politecnico di Torino



Figura 1 – Il logo del progetto GIQS, Graphene Impedance Quantum Standard, e dei partner del progetto

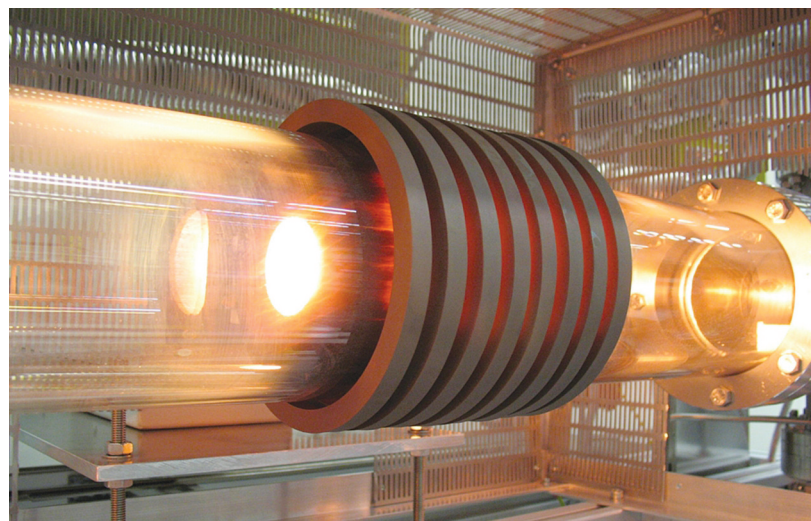


Figura 2 – Fornace per la preparazione dei film di grafene. Il grafene viene fatto crescere su un substrato di carburo di silicio, con un processo PASG (polymer-assisted sublimation graphene) alla temperatura di 1800 °C, per 5 min in atmosfera di argon

LE ATTIVITÀ DEI PARTNER ITALIANI

I partner italiani del progetto sono due unità del Gruppo di Misure Elettriche ed Eletttroniche: l'INRIM, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, settore QN02 *Metrologia elettrica quantistica*, e il Politecnico di Torino, Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni.

L'attività congiunta prevede:

- la realizzazione di un ponte completamente digitale in grado di confrontare un campione di capacità con la resistenza quantizzata di Hall;
- lo sviluppo di un sistema criomagnetico per la misura, in regime continuo e alternato, di dispositivi a effetto Hall quantistico in grafene;
- attività di modellistica elettrica per la determinazione e la minimizzazione degli errori causati dai parametri parassiti (capacità, induttanze) nei sistemi di misura che includano dispositivi a effetto Hall quantistico;
- l'integrazione del ponte digitale e del sistema criomagnetico in un sistema per la realizzazione dell'unità di capacità con riferibilità alle costanti fondamentali h ed e ;
- la gestione delle attività di impact del progetto verso il mondo scientifico e industriale.

PRIMI PROGRESSI

Il progetto, di durata triennale, è partito a giugno 2019. I primi dispositivi in grafene epitassiale sono in produzione presso il Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Fig. 2). Dopo una caratterizzazione in regime continuo e alternato verranno resi disponibili ai partner.

Presso i laboratori dell'INRIM è stato installato un primo sistema criomagnetico (Fig. 3) in grado di portare il di-

positivo in misurazione, completamente schermato e accessibile con connessioni coassiali, alla temperatura di 4.2 K e campi magnetici sino a 6 T. Il sistema è stato provato con un dispositivo semiconduttore in GaAs.

Un ponte di misura completamente digitale, basato su una nuova sorgente digitale polifase realizzata dall'Università di Zielona Gora [6], è stato assemblato (Fig. 4) ed è in fase di sperimentazione.

Il ponte è ottimizzato per il confronto di un campione di capacità del valore nominale 8 nF con la resistenza di Hall quantizzata, alla frequenza di 1541 Hz (per la quale, capacità e resistenza presentano lo stesso modulo dell'impedenza nominale). Il campione da 8 nF può essere poi scalato ai valori decadici che costituiscono il campione nazionale italiano di capacità elettrica, con i ponti di rapporto già presenti presso l'INRIM.

L'attività modellistica è in corso ed è volta a estendere le tecniche analitiche e numeriche, già sviluppate prevalentemente

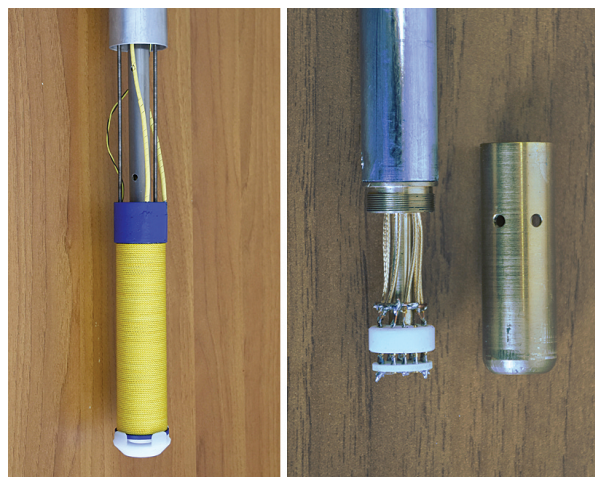


Figura 3 – Discendente criomagnetico coassiale (a sinistra). Il magnete superconduttore da 6 T montato al termine del discendente (a destra). Il portacampioni schermato, con connessioni coassiali al campione



per il regime continuo [7], anche al regime alternato, per poter così minimizzare gli errori causati dai parametri parassiti dei nuovi dispositivi, del sistema criomagnetico e del ponte digitale nella misura della resistenza di Hall quantizzata.

RINGRAZIAMENTI

Il progetto GIQS, *Graphene Impedance Quantum Standard*, ha ricevuto fondi dall'European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR), cofinanziato dagli Stati partecipanti e dal programma di ricerca e innovazione dell'Unione europea Horizon 2020.

This project received funding from the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) cofinanced by the Participating States and from the European Unions' Horizon 2020.

Gli autori ringraziano i partner del progetto e in particolare il coordinatore del progetto, Klaus Pierz (PTB) per la Fig. 2.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Consultative Committee for Electricity and Magnetism, "Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI," 20 May 2019, Appendix 2 of the SI Brochure for the "Revised SI". Disponibile online: www.bipm.org.

[2] J. Schurr, V. Bürkel, B. P. Kibble, "Realizing the farad from two ac quantum Hall resistances", *Metrologia* vol. 46, n. 6, 619-628 (2009).

[3] EMPIR JRP 18SIB07 GIQS: Graphene Impedance Quantum Standard. ptb.de/empir2019/giqs, [linkedin.com/groups/8824119](https://www.linkedin.com/groups/8824119).

[4] R. Ribeiro-Palau, F. Lafont, J. Brun-Picard, D. Kazazis, A. Michon, F. Cheynis, O. Couturaud, C. Consejo, B. Jouault, W. Poirier, F. Schopfer, "Quantum Hall resistance standard in graphene devices under relaxed experimental conditions," *Nature Nanotech.*, vol. 10, pp. 965-971, 2015.

[5] M. Ortolano, L. Palafox, J. Kučera, L. Callegaro, V D'Elia, M. Marzano, F. Overney, G. Gülmez, "An international comparison of phase angle standards between the novel impedance bridges of CMI, INRIM and METAS", *Metrologia* vol. 55, n. 4, pp. 499-512 (2018).

[6] M. Kozioł, J. Kaczmarek, R. Rybski, "Characterization of PXI-based generators for impedance measurement setups". In: 2018 Conf. Precis. Electromagn. Meas. (CPEM 2018). Paris, France, July 2018, pp. 1-2.

[7] M. Marzano, T. Oe, M. Ortolano, L. Callegaro, N.-H. Kaneko, "Error modelling of quantum Hall array resistance standards", *Metrologia* vol 55, n. 2, (2018).

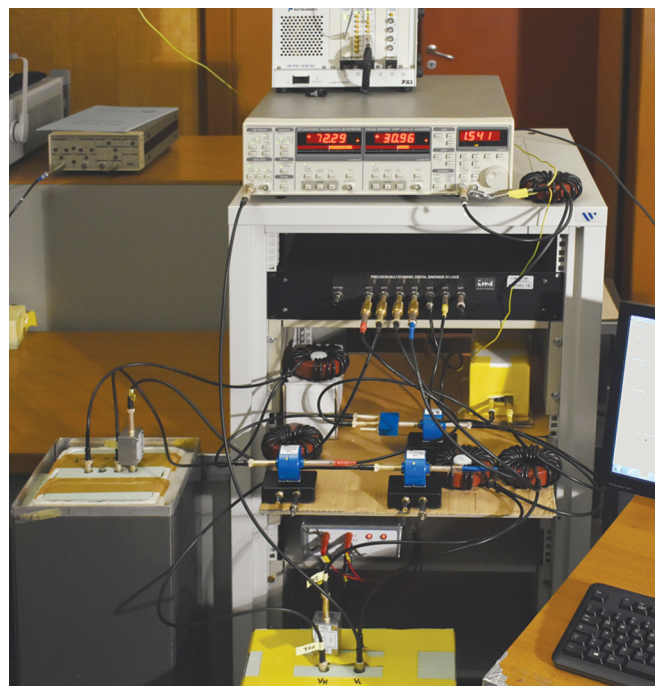


Figura 4 – Ponte digitale per il confronto di un campione di capacità con la resistenza quantizzata di Hall. In fase di sviluppo, il dispositivo Hall è sostituito da un resistore convenzionale



Luca Callegaro è dirigente di ricerca presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica. È responsabile del settore QN02: Metrologia Elettrica Quantistica dell'INRIM, dei Campioni Nazionali italiani d'impedenza elettrica, dell'Unità di Ricerca INRIM del GME e contact person del progetto GIQS.



Vincenzo D'Elia è collaboratore tecnico per gli Enti di Ricerca, presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM). È responsabile dei laboratori di metrologia dell'impedenza elettrica.



Martina Marzano è dottore di ricerca in Metrologia e assegnista di ricerca presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica. La sua attività di ricerca riguarda la metrologia dell'impedenza elettrica e l'effetto Hall quantistico.



Massimo Ortolano è ricercatore confermato presso il Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni del Politecnico di Torino e dal 2006 collabora con l'INRIM su temi legati alla metrologia dell'impedenza elettrica. È contact person del Politecnico di Torino per il progetto GIQS.



Danilo Serazio è collaboratore tecnico per gli Enti di Ricerca, presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM). La sua attività si concentra sulla metrologia della potenza ed energia elettrica.



Ngoc Thanh Mai Tran è ingegnere elettronico e studente di dottorato di ricerca in Metrologia presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) e il Politecnico di Torino, su temi di metrologia dell'impedenza elettrica.